

Article, Published Version

Pfletschinger-Pfaff, Heike; Kayser, Jan; Steeb, Holger

Mikrozellenversuche zur kleinskaligen Untersuchung von hydraulisch induziertem Partikeltransport in porösen Medien

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102492>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pfletschinger-Pfaff, Heike; Kayser, Jan; Steeb, Holger (2017): Mikrozellenversuche zur kleinskaligen Untersuchung von hydraulisch induziertem Partikeltransport in porösen Medien. In: BAWMitteilungen 100. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 77-89.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Mikrozellenversuche zur kleinskaligen Untersuchung von hydraulisch induziertem Partikeltransport in porösen Medien

Microcell Experiments for Small-Scale Studies of Hydraulically Induced Particle Transport in Porous Media

Dr. Heike Pfletschinger-Pfaff; Dr. Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau;
Prof. Dr. Holger Steeb, Universität Stuttgart

In der vorgestellten Studie wurden zweidimensionale Mikrozellenversuche zur Evaluierung des Einflusses der Ausrichtung von Strömungslinien auf den hydraulischen Transport von Feinpartikeln auf der Porenskala durchgeführt. Hierzu wurden zwei periodisch angeordnete Mikrostrukturen untersucht. Versuche wurden mit Partikeln durchgeführt, die generell die Strukturzwischenräume passieren konnten. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Änderung der Porenmorphologie, hier im Speziellen der Winkelanordnung der Strömungskanäle trotz Beibehaltung der hydraulischen Durchlässigkeit, das Transport- und Absetzungsverhalten der Partikel in der Struktur änderte. Eine Änderung der Partikelkonzentration und Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb des laminaren Regimes zeigten, dass die Blockierung von Strömungskanälen durch sich festsetzende Partikel abhängig ist von der Anordnung von Haupt- und Nebenströmungskanälen. Unterschiedliche Partikelgrößen beeinflussten lediglich die Initiierung von Kanalblockierungen durch Partikel, jedoch nicht Mechanismen der Blockierungsdynamik und Anhaftung einzelner Partikel. Die zweidimensionalen Experimente zeigten darüber hinaus, dass effektive volumetrische Größen wie die Porosität oder die intrinsische Permeabilität, die für beide untersuchten Strukturen gleich waren, nicht repräsentativ für die Charakterisierung des hydraulischen Materialtransports sind. Eine wichtige morphologische Größe war hingegen die Porenstruktur, die die Strömungslinienführung des Partikeltransports bestimmt. Zur Implementierung in größerskalige Studien von hydraulischem Materialtransport sollte die Porenstruktur daher zumindest schematisch evaluiert und qualitativ berücksichtigt werden. Die Experimente waren Teil von Grundlagenstudien zum Transport von Feinpartikeln eines Bodens in einem groben Bodenskelett. Sie bilden die

physikalische Grundlage für makroskopische numerische Berechnungsmodelle für die Evaluierung der Stabilität von Erdbauwerken an Wasserstraßen. Die Ergebnisse zeigen, dass für zuverlässige großskalige numerische Berechnungen die porenskaligen Prozesse zur Dynamik von Partikeltransport in porösen Medien grundsätzlich verstanden sein müssen.

Pore-scale experiments were performed to evaluate the influence of structure alignment on non-colloidal particle transport by single particle observation and tracking. In this study, two different periodic pore structures were investigated with particles generally small enough to pass all channels. The results showed that changing the angular alignment of the streamlines causes significantly different single-particle deposition mechanisms. Changing the particle concentration and fluid velocities in the laminar flow regime confirmed that, within a critical range of these variables, channel blockage depends on the arrangement of main and side channels and thus on the possibility for particles to bypass existing blockages. The influence of different particle sizes only concerned blocking initiation, not blocking dynamics or single particle attachment. The experiments showed that effective volumetric quantities such as porosity (fixed during the experiments) are not representative alone for evaluating particle transport and particle attachment. Moreover, the pore structure parameters which determine the streamlines for particle transport should be at least schematically evaluated. The experiments are part of fundamental studies on the transport of fine soil particles in coarse-grain soil skeletons for assessing the stability of earthen dams. As such, they support efforts to learn more about the physical parameters influencing the possibility and dynamics of particle transport in porous media.

1 Einleitung *Introduction*

Eine Voraussetzung für die Standsicherheit von durchströmten Erdbauwerken, wie z. B. Deichen für den Hochwasserschutz oder Kanaldämmen, ist eine ausreichende Sicherheit gegen Materialtransport im Boden infolge hydrodynamischer Beanspruchung. Eine wesentliche Art des durch Strömungskräfte des Wassers im Boden ausgelösten Transports von Bodenpartikeln ist die Suffosion. Dabei werden feine Fraktionen eines Bodens im Porenraum des Korngerüsts der groben Fraktionen hydraulisch losgelöst, transportiert und ggf. auch wieder angelagert. Das zweidimensionale Bild 1 veranschaulicht exemplarisch den Transport feiner Partikel durch das Korngerüst der Grobkornfraktion.

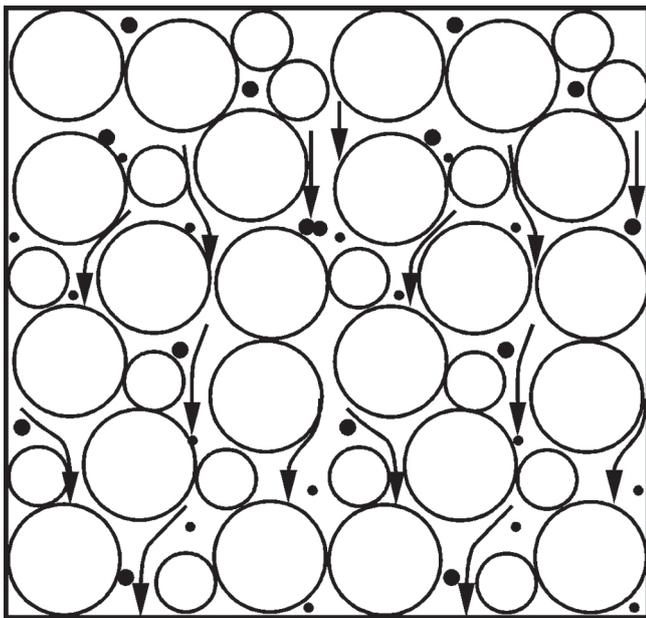


Bild 1: Materialtransport im Boden durch Suffosion (MMB, 2013)

Figure 1: Particle transport in soil (MMB, 2013)

Anfällig gegen Suffosion sind Böden mit einer ausgeprägten Ausfallkörnung mit einem feinen Anteil unter 30 Masse-% (A in Bild 2) und Böden mit sehr weit gestufter, überwiegend links gekrümmter Körnungslinie (B in Bild 2). Bild 2 zeigt derartige Kornverteilungen.

Der hydraulische Transport und die Anhaftung von feinen Bodenpartikeln in einem groben Bodenporenskelett verändert die effektiven hydro-mechanischen Bodeneigenschaften und kann darüber hinaus die Stabilität eines gesamten Bodenkörpers beeinträchtigen. Zur hydraulischen Stabilitätssicherung von Erdbau-

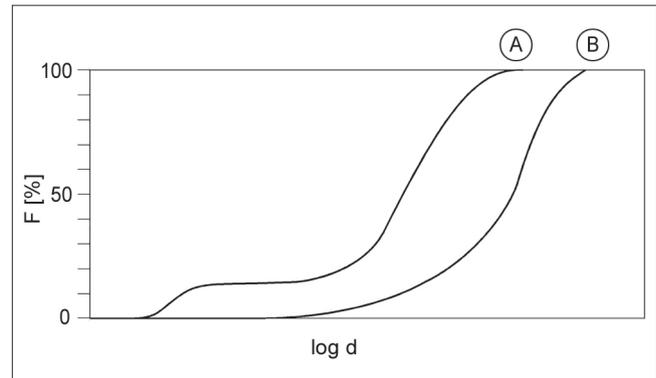


Bild 2: Körnungslinien suffosionsgefährdeter Böden (MMB, 2013) (F = Anteil der Summenlinie in Masse-%, d = Korndurchmesser)

Figure 2: Grain-size distribution curves of soils susceptible to suffusion (MMB, 2013) (F = ratio of mass curve in mass %, d = grain diameter)

werken werden spezifische Filterregeln berücksichtigt. Einfache konstruktive Filterregeln wurden schon von Terzaghi (1925) vorgeschlagen und in den letzten 100 Jahren laufend verbessert (z. B. Kenney, Lau, 1985). Filterregeln basieren in der Regel auf der Korngrößenverteilung des Erdmaterials und sollen einen stabilitätschwächenden hydraulischen Transport des Feinmaterials unterbinden. Sie basieren auf einer Überprüfung, ob feine Partikel Porenkanäle hinsichtlich deren Größe und Geometrie passieren können. Ist dies gegeben, so ist für den Materialtransport ein hydraulischer Gradient zur Initiierung der Bewegung der Feinteile nötig (Marot, Benamar, 2012). Filterregeln mit gesetzten geometrischen und hydraulischen Bedingungen werden in der Regel aus der Korngrößenverteilung des Gesamtmaterials gesetzt ohne auf spezifische Informationen der Porenstrukturen, die aus der lokalen Verteilung und Lagerung des Materials resultieren oder die mikroskopischen Formen der Feinteile oder der Porenkanäle zu berücksichtigen (Indraratna, Locke, 1999).

Zur Betrachtung von Strömungs- und Transportvorgängen im Boden und bestimmende physikalische Parameter können unterschiedliche Betrachtungs- und Charakterisierungsskalen genutzt werden. Die Mikroskala beschreibt hierbei die Porenstruktur des Bodens unter Berücksichtigung der mikroskopischen Porenmorphologie (Dullien, 1992). Zur Betrachtung des Transportes einzelner Bodenfeinteile wird diese Skala herangezogen. Hinsichtlich eines Bodengefüges ist die Porenstruktur der Mikroskala stark heterogen. Zur Betrachtung eines Bodenkörpers auf einer größeren Skala, der Makroskala, werden daher oft volumenge-

mittelte Parameter verwendet, die einzelne Porenstrukturen (Porenengstellen oder Porengeometrien) nicht berücksichtigen. Klassische volumengemittelte Größen sind unter anderem die Porosität und bei granularen Medien davon abgeleitet die intrinsische Permeabilität (Carrier III, 2003; Dullien, 1992). Prozesse, die durch mikrostrukturelle Poreneigenschaften beeinflusst werden, wie der Transport von Feinteilen in der Bodenstruktur, sind allerdings in volumengemittelte makrostrukturelle Bodeneigenschaften schwer integrierbar. Zur Implementierung mikrostruktureller Prozesse in makroskopische Modelle werden daher meist empirische Anpassungsparameter gewählt.

Eine Möglichkeit der Implementierung mikroskaliger Prozesse des hydraulischen Materialtransports in makrostrukturelle Modellformulierungen ist die Erfassung und Beschreibung eines repräsentativen Volumenelementes (RVE) des Bodens und die mathematische Modellierung des Bodens als Mehrphasensystem mit Konzepten der kontinuumsmechanischen Mischungstheorie (Coussy, 2010). Der Boden wird hierbei als ein Kontinuum betrachtet, das an einem materiellen Punkt aus verschiedenen Konstituenten zusammengesetzt ist. Im Rahmen der Theorie Poröser Medien (Ehlers, Bluhm, 2002) ordnet man darüber hinaus den Konstituenten Volumenanteile zu, welche die Zusammensetzung repräsentativ beschreiben. Für die hier betrachteten Böden wird der Feststoffanteil des Bodens weiter unterteilt in einen Bodenfeinteil und ein stabiles Bodenskelett. Es soll allerdings betont werden, dass die reale Mikrostruktur, d. h. die Bodenmorphologie im Rahmen dieser Mischungsmodelle nicht weiter berücksichtigt wird (z. B. Schauffler et al., 2013; Steeb, 2010; Zhang et al., 2013). Der Transport bzw. die Ablösung und Anhaftung von Feinteilen wird hierbei als konstitutiv zu bestimmender Produktionsterm, der den Austausch zwischen flüssiger und fester Phase beschreibt, eingeführt (Schauffler et al., 2013). Die spezielle mathematische Form des Produktionsterms basiert hierbei auf Untersuchungen zum Filtrationsverhalten in porösen Medien (z. B. Sakthivadivel, 1969) und wird an experimentelle Daten bezüglich des zu beschreibenden Mediums angepasst (z. B. McDowell-Boyer et al., 1986; Sakthivadivel et al., 1972). Zur prädiktiven Verwendung eines solchen Modells ist jedoch ein vertieftes Verständnis der Prozesse auf der Porenraumskala notwendig, um eine entsprechende konstitutive Formulierung physikalisch-basiert entwickeln zu können. Mikrome-

chanische Untersuchungen sind daher wichtig für eine bessere makroskopische Beschreibung des Bodens und zur Vernetzung physikalischer Beobachtungen auf der Mikroskala mit möglichen Konstitutivparametern der Makroskala.

Generell beinhaltet der hydraulische Materialtransport die Prozesse des Ablösens, des Transports und der Anhaftung von Feinteilen in einem Bodenskelett. Die Anhaftung von Feinteilen bewirkt eine Modifizierung der Porenstruktur, Änderungen in der lokalen und nachfolgend eventuell in der Gesamtpermeabilität und führt zu weiteren Blockierungen von Feinteilen (Chen et al., 2008). Die Integration der dominierenden mikroskaligen Parameter der Porengrößen und Porenmorphologie kann in klassischen makroskaligen Modellen nur über einen Reduktions- oder Vergrößerungs-Faktor bezüglich der Porosität oder Permeabilität eingeführt werden. Entsprechende Experimente basieren in der Regel auf mesoskaligen Säulenexperimenten (z. B. Moffat und Fannin, 2006). Hier können der Austrag von Feinmaterial und resultierende Änderungen der hydraulischen Eigenschaften innerhalb einer Bodensäule bestimmt werden (z. B. Skempton und Brogan, 1994; Sterpi, 2003). Jedoch geben diese Experimente keine Information über spezifische Transportmechanismen und lokale Prozesse.

Zur besseren Beschreibung und Implementierung von hydraulischem Materialtransport sind mikroskalige Prozesse besser zu verstehen und abzubilden. Transport-, Anhaftungs- und Ablösungsmechanismen in Abhängigkeit von Kanalbreiten, Partikelgrößen und Fluidgeschwindigkeiten wurden bereits in Mikromodellen bezüglich des Transports und Filtermechanismen von Kolloidpartikeln in Filtermedien studiert (z. B. McDowell-Boyer et al., 1986; Auset und Keller, 2004 und 2006; Bacchin et al., 2014). Im Gegensatz hierzu sollten aber auch nicht-kolloidale Partikel insbesondere hinsichtlich des Verhaltens von Einzelpartikeln studiert und berücksichtigt werden. Hierbei wird allgemein angemerkt, dass die Blockierung nicht-kolloidaler Partikel bei Porenengstellen, die kleiner als der Partikeldurchmesser sind, erfolgt und Transport bei Poren die 1,5 mal größer als die Feinpartikel sind, erfolgt (Marot und Benamar, 2012).

Zum besseren Verständnis des Verhaltens nicht kolloidaler Partikel in Kanalstrukturen, die geometrisch

für die Partikel durchgängig sind, wurde eine zweidimensionale Mikrozelle entwickelt und darin Transportexperimente durchgeführt. Mikrozellenversuche dienen im Allgemeinen der orts aufgelösten Analyse von Prozessen auf einer visuell zugänglichen Porenskala unter kontrollierten Anfangs- und Randbedingungen. Sie können hinsichtlich ihrer Strukturgeometrie klassifiziert werden (Karadimitriou, Hassanizadeh, 2012). Durch die Versuchsanordnung perfekter regulärer Strukturen konnten Studien zu homogenen Anfangsbedingungen bezüglich Strömungs- und Transportmechanismen durchgeführt werden.

Es wurden Transport- und Anhaftungsmechanismen von runden Partikeln (Durchmesser 0,1 mm bis 0,5 mm) in homogenen wassergesättigten Porenstrukturen (Durchmesser der Porenkanäle 1,0 mm) unter unterschiedlichen hydraulischen Gradienten untersucht. Die Partikelgröße entspricht einem Fein- bzw. Mittelsand, sodass im Vergleich zur Natur keine Maßstabeffekte zu berücksichtigen sind. Die Partikel sind klein genug, um generell die Porenkanäle passieren zu können, und groß genug zur Durchführung einer Bildanalyse einzelner Partikel. Durch die Anwendung von Partikel-Detektionsmethoden über Videoaufnahmen mit hoher Auflösung konnten Anhaftung und Blockierungsmechanismen der Partikel in der Struktur, sowie Stromlinien und Geschwindigkeiten einzelner Partikel analysiert werden.

Die Experimente sollen ein bestehendes Kontinuumsmodell unterstützen, indem sie den konstitutiv zu beschreibenden Massenaustausch zwischen den beteiligten Konstituenten weiter spezifizieren (Steeb, 2010; Pfltschinger-Pfaff et al., 2014). Das Modell unterteilt ein RVE nicht nur in die im poroelastischen Modell übliche Fest- und Flüssigkeitsphase (Ehlers, Bluhm, 2002), sondern berücksichtigt darüber hinaus eine Phase der anhaftenden Feinteile, die grundsätzlich mobil sind, aber bei den gegebenen Rand- und Anfangsbedingungen an der festen Phase anhaften, sowie die Phase der suspendierten Feinteile, die sich aufgrund der gegebenen Anfangs- und Randbedingungen mit dem Fluid bewegen (Bild 3).

Das Vierphasenmodell beschreibt damit den hydraulischen Materialtransport als einen Austausch zwischen der Phase der dem Festkörper zugeordneten immobilen angelagerten Feinteile und den im Fluid suspendierten mobilen Feinteilen.

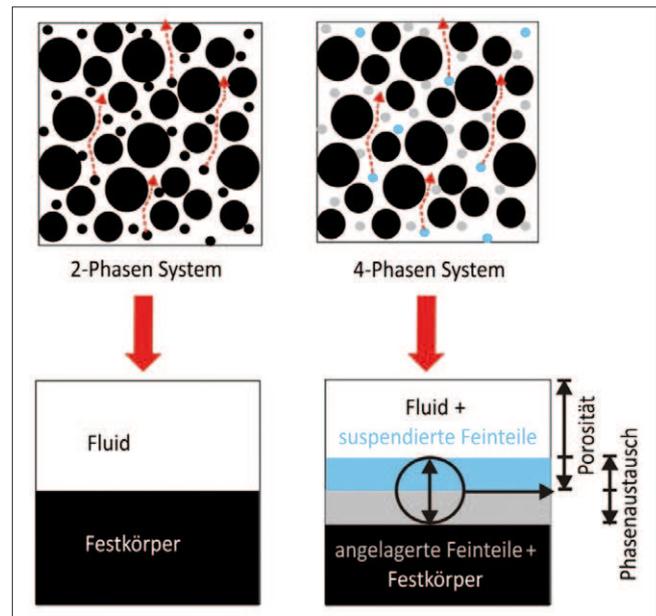


Bild 3: Schematische Darstellung des 4-Phasen Systems zur kontinuumsmechanischen Beschreibung von hydraulisch induziertem Materialtransport (Pfltschinger-Pfaff, 2014)

Figure 3: Sketch of a 4-phase system to describe hydraulically induced material transport in a continuum (Pfltschinger-Pfaff, 2014)

2 Material und Methoden

Material and methods

Zur Betrachtung des hydraulischen Partikeltransportes und den damit zusammenhängenden Blockierungsmechanismen in einer Porenstruktur wurden kleinskalige Zellenversuche entworfen und durchgeführt. Die Experimente wurden stark simplifiziert konzipiert, um mit wenigen Parametern explizite Bezugnahme auf Änderung einzelner konkreter Parameter nehmen zu können. Die Versuche wurden hinsichtlich Partikelmengen, Partikeltransport und Anhaftungsmechanismen, sowie Partikel Strömungslinien und Geschwindigkeiten ausgewertet.

2.1 Mikrozelle

Microstructures

Im Zuge der Untersuchungen wurde zwei verschiedene Strukturanordnungen zur Definition des Strömungsfeldes verwendet. Beide Strukturanordnungen sind in der Zellfläche homogen und unterscheiden sich lediglich im Anströmwinkel. Somit haben beide Gesamtstrukturen die gleiche Porosität, jedoch unterschiedliche Tortuo-

sitäten und somit unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeiten.

Die homogenen Zellstrukturen wurden mit Hilfe einer CNC-Fräse aus Acrylglasblöcken hergestellt. Die Strömungskanäle wurden mit einer Breite von 1 mm gefräst. Die Höhe der Kanäle bzw. der Zellen wurde 0,1 mm größer als der Durchmesser der Versuchspartikel gewählt, sodass ein zweidimensionaler Partikeltransport in den Versuchen gewährleistet war und es zu keinen Partikelüberlagerungen kam. Die quadratischen Strukturen mit einer Seitenlänge von 2 mm wurden in Struktur 1 mit der breiten Seite in Strömungsrichtung angeordnet, in Struktur 2 wurde die Gesamtstruktur um 45 Grad gedreht (Bild 4c). Dies führte über den Tortuositäts-Faktor

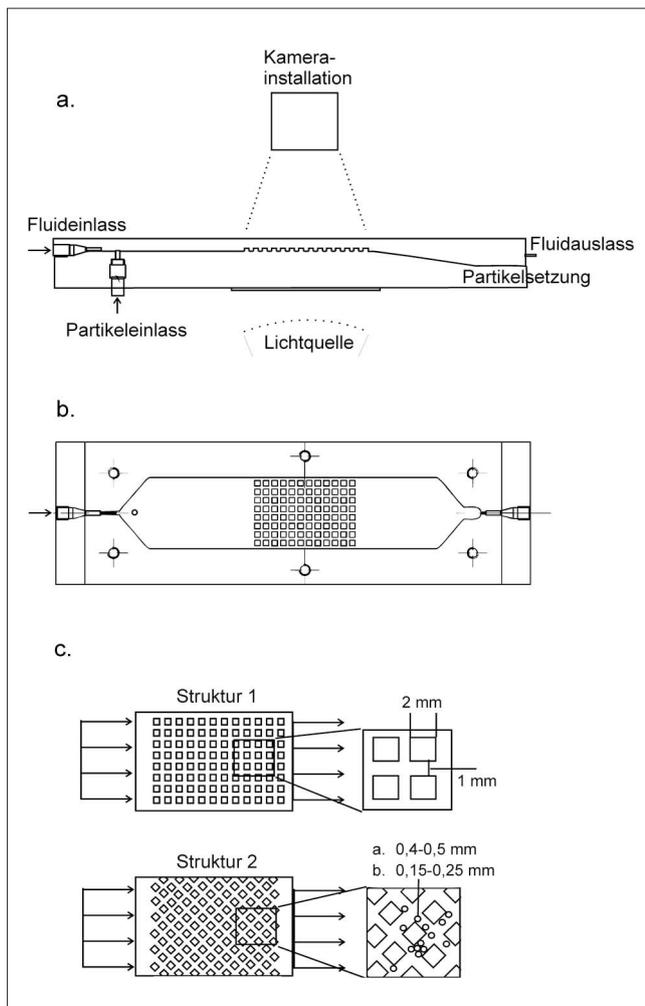


Bild 4: Experimenteller Aufbau a. Seitenansicht b. Aufsicht c. Schema Mikrostruktur 1 (gerade Strömungskanäle) und Mikrostruktur 2 (um 45° gedrehte Struktur)

Figure 4: Experimental setup with a. side view b. plan view c. schematic drawing of microstructure 1 (straight channels) and microstructure 2 (structure rotated by 45°)

zu einer Minderung der intrinsischen Permeabilität um den Faktor 0.7071 für einen einzelnen Strömungskanal in Struktur 2. Der Tortuositätsfaktor ist definiert aus dem Mittel des lokalen Kosinus zwischen Strömungsrichtung und kürzester Distanz (Bear, 1972). Es bleibt zu beachten, dass der Tortuositätsfaktor nur für die Kanäle in Strömungsrichtung gilt und in Struktur 1 wurden somit die Nebenkanäle nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz entspricht auch den in den Versuchen festgestellten Partikelbewegungen.

Die gesamten Versuchszellen bestehen neben der optisch zugänglichen Mikrostruktur aus einem Ein- und Auslass für das Strömungsfluid, einem Einlass für die Partikel, einem Homogenisierungsbereich vor der Struktur und einem Beruhigungsbereich zum Absetzen der Partikel hinter der Struktur (Bild 4a).

Vor Versuchsbeginn wurde die Zelle mit entionisiertem und entgastem Wasser gesättigt. Ebenso wurden die Versuche mit entionisiertem und entgastem Wasser durchgeführt.

Die Zelle wurde an einem Rahmen befestigt. Unter der Zelle wurde eine Lichtquelle angebracht. Über der Zelle wurde eine Kamera zur kontinuierlichen Aufnahme der Zellstruktur angebracht (Bild 4a).

2.2 Partikel Particles

Versuche wurden mit Partikeln mit den Durchmessern 0,4 mm bis 0,5 mm (Glaspartikel) und 0,1 mm bis 0,2 mm (Keramikpartikel) durchgeführt. Damit ist der Strömungskanal zwei- bis zehnfach größer als die Partikel, d. h. geometrisch konnten alle Partikel die Kanäle passieren, es kann jedoch zur Brückenbildung oder Blockierung durch mehrere Partikel in einem Kanal kommen (Khilar und Fogler, 1998). Die Partikelzufuhr erfolgte über eine an der Zelle angebrachte 2 ml Spritze. Die Partikel in der Spritze wurden vor Versuchsbeginn mit entionisiertem und entgastem Wasser gesättigt.

Die Glaspartikel mit einer Dichte von $2,95 \text{ g/cm}^3$ bestanden aus recyceltem Bleiglas (Kremer Pigmente Artikel-Nr. 59800). Die Rundheit der Partikel, definiert als Durchschnittsradius von Ecken und Kanten geteilt durch den Radius des maximalen einschließenden Kreis in ei-

nem Partikel (Wadell, 1935) ist laut Hersteller mit 1 ideal rund. Die Sphärität, definiert als die Kubikwurzel des Volumens eines Partikels geteilt durch das Volumen einer das Partikel umschließenden Kugel (Wadell, 1934) ist mit 0,98 angegeben.

Für die kleineren Partikel wurden Keramikpartikel gewählt, da diese optisch besser zu detektieren waren. Es wurden Keramikpartikel aus Zirkonoxid gewählt (Art-Nr. SAZ-ER 120 A/S von Mühlmeier Mahltechnik GmbH). Die Rundheit der Partikel lag laut Hersteller bei 0,7, die Sphärität größer als 0,8. Die Dichte der Keramik beträgt $3,8 \text{ g/cm}^3$.

Die Partikelzufuhr wurde über einen hochauflösenden Linearaktuator (Eigenbau), der mit einem Schrittmotor angetrieben wurde, kontrolliert.

2.3 Fluid

Fluid

Die Experimente wurden mit entionisiertem und entgasstem Wasser durchgeführt. Zur Entgasung wurde das Fluid über einen Inline-Entgaser (Knauer V6880 Azura) geleitet.

Das Fluid wurde über eine 50 ml Spritze in die Zelle injiziert. Die Strömungsrate wurde über einen hochauflösenden Linearaktuator (Eigenbau, siehe oben), der mit einem Schrittmotor angetrieben wurde, kontrolliert. Die Versuche wurden mit Strömungsraten zwischen 0,1 ml/s und 0,4 ml/s durchgeführt.

2.4 Datenerfassung

Data acquisition

Oberhalb der Zelle wurde eine CCD-Kamera verwendet mit einem Objektiv langer Brennweite (Rodenstock, Apo-Rodagon, 4,5/90). Zur Nutzung kurzer Belichtungszeiten von 0,2 ms wurde eine Lichtquelle unterhalb der Zelle platziert (Bild 4a). Zur gleichmäßigen Ausleuchtung wurde eine Milchglasscheibe unter der Zelle angebracht.

Während den Experimenten wurden Videos mit einer Einzelbildfrequenz zwischen 12 und 20 Aufnahmen pro Sekunde genommen. Über eine USB-Schnittstelle wurden diese direkt im PC verarbeitet und mit einer Bildbearbeitungssoftware visualisiert.

2.5 Strömungslinien- und Partikelanalyse

Flow and particle line analysis

In den Zellen wurden aufgrund der gewählten Strömungsgeschwindigkeiten grundsätzlich laminare Strömungsverhältnisse angenommen. Trotzdem war an Strukturecken und um Partikelagglomerate mit turbulenten Wirbeln zu rechnen. Insgesamt waren die beiden Strukturen durch ihre unterschiedlichen Anströmwinkel durch unterschiedliche Strömungsprofile in der Gesamtstruktur gekennzeichnet. Zur Visualisierung der Strömungslinien und zum besseren Verständnis der Partikelströmungslinien und des Partikelverhaltens wurden Strömungsberechnungen durchgeführt. Die Stromlinienberechnungen wurden mit dem CFD Modul der Software Comsol-Multiphysics® durchgeführt (Finite Elemente Implementierung der inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen).

Die Experimente wurden hinsichtlich absoluter Partikeldurchgänge und Anhaftungsmechanismen ausgewertet. Es wurden sowohl Auszählungen vorgenommen als auch Geschwindigkeiten und Ganglinien der Partikel analysiert. Zur Analyse der Geschwindigkeiten und Ganglinien wurden Tracking-Algorithmen im Java-basierten Bildbearbeitungsprogramm ImageJ (Ferreira und Rasband, 2012) angewendet. Zur automatisierten Detektion und automatisierten Ganglinienanalyse wurde das Programm Plug-in Particle Tracker (Sbalzarini und Koumoutsakos, 2005) verwendet. Zur Bestimmung exakter Geschwindigkeiten einzelner Partikel mittels manuellem Partikel-Tracking wurde das Programm Plugin MTrackJ (Meijering et al., 2012) eingesetzt.

3 Ergebnisse

Results

3.1 Strömungsberechnungen der beidem Zellstrukturen

Computational fluid dynamics of the two structures

Die Strömungsberechnungen mit Comsol-Multiphysics® verdeutlichten die Hauptströmungslinien und Unterschiede der Strömungsverteilungen in den beiden Strukturen. In der geraden Struktur sind die Hauptströmungskanäle die in Strömungsrichtung offenen Kanäle

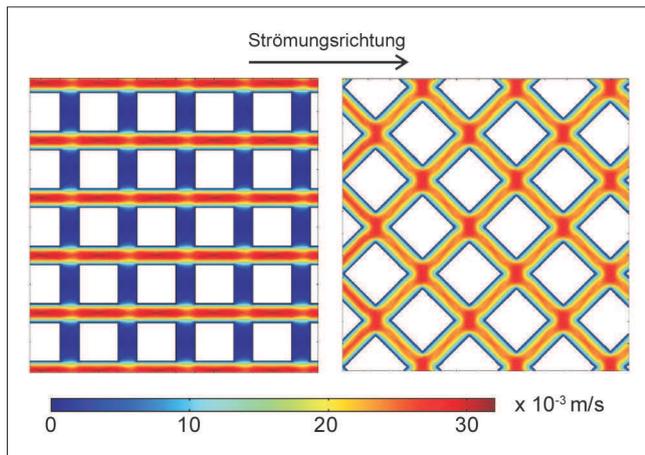


Bild 5: Strömungsverteilung in den beiden Versuchsstrukturen mit einer Einströmgeschwindigkeit von 0,16 ml/s (die Berechnungen wurden durchgeführt mit Comsol-Multiphysics®)

Figure 5: Flow velocity distribution in the two studied structures for an inflow rate of 0.16 ml/s (performed with Comsol-Multiphysics®)

mit maximalen Geschwindigkeiten in der Kanalmitte. In den Verbindungskanälen, die quer zur Strömungsrichtung liegen, ist die Strömung annähernd null. In der gedrehten Struktur sind in allen Kanälen gleiche Strömungsverhältnisse anzutreffen. Maximalgeschwindigkeiten in den Kanälen sind bei gleichen Einströmgeschwindigkeiten in die Gesamtstruktur niedriger als in der geraden Struktur und treten an den Kanalverbindungen auf (Bild 5). Verlangsamte Strömungen um die Strukturelemente entsprechen der Hälfte der Kanalweite, sodass in den Hauptströmungskanälen größere potenzielle Ruhepunkte für die Partikel gegeben sind.

3.2 Partikelanhaftung

Particle attachment

Für die beiden unterschiedlichen getesteten Versuchsstrukturen konnten mit Hilfe der visuellen Versuchsauswertung unterschiedliche Mechanismen der Partikelanhaftung und -blockierung ermittelt werden.

Das Anlagern bzw. das Ruhen einzelner Partikel in den Strömungskanälen war nur in der gedrehten Struktur zu beobachten. Um die Strukturelemente herum, in Zonen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten (s. Bild 5), kamen einzelne Partikel in allen Versuchsdurchläufen zum Stillstand und lagerten sich an (Bild 6, unten). Durch das Ruhen einzelner Partikel an den Strukturelementen lagerten sich teilweise weitere nachfolgende Partikel

entlang der Strömungslinien an. Ein weiteres Phänomen einzelner Partikel in Struktur 2 war das Anlagern an der Spitze eines Strukturelements nachdem ein Partikel die Hauptströmungslinie verlassen hatte.

In beiden Strukturen kam es bei den Versuchsdurchläufen mit den größeren Partikeln (Durchmesser ca. 0,5 mm) zu Blockierungen der Strömungskanäle durch mehrere kollidierende Partikel. Nachfolgende einströmende Partikel erhöhten die Blockierung, sodass insbesondere in Mikrostruktur 1 komplette Strömungskanäle nicht mehr passierbar waren (Bild 6 oben). Nur vereinzelt strömten Partikel durch die seitlichen Verbindungskanäle um die Blockaden herum, abhängig von den durch die Blockaden gebildeten veränderten Strömungsverhältnissen. In der gedrehten Mikrostruktur 2 wurden die Strömungskanäle nur bis zur nächsten Kanalverzweigung blockiert. Dementsprechend waren die Blockierungen kleiner und es war für darauffolgende Partikel eine Möglichkeit der Umströmung über eine weitere Strömungslinie gegeben (Bild 6 unten).

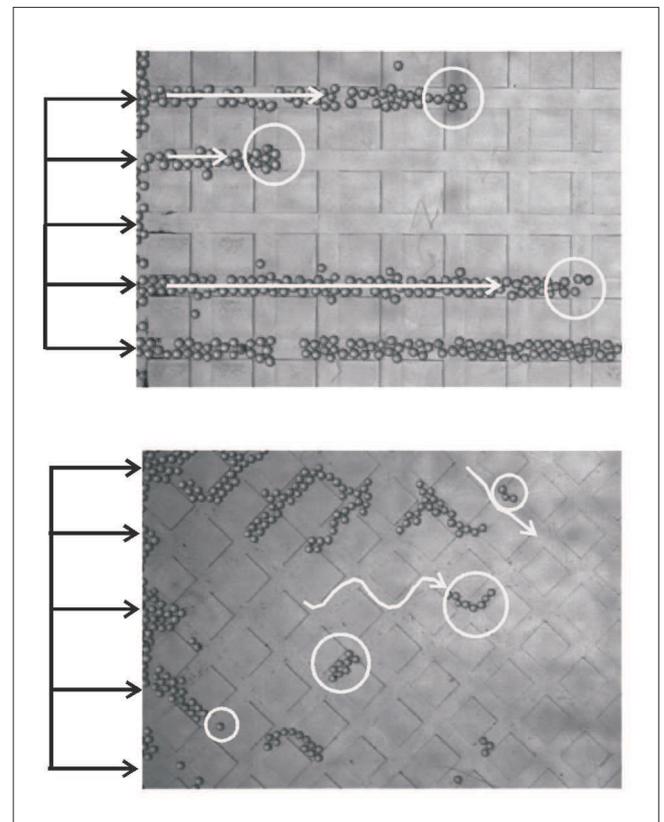


Bild 6: Unterschiedliche Partikelformationen durch Struktur-anhaftung resultierend aus unterschiedlichen Strömungslinien in Struktur 1 und Struktur 2

Figure 6: Particle attachment patterns and possible particle flow paths of following particles in structure 1 and structure 2

In beiden Strukturen lösten sich Blockierungen nur auf, wenn sich die Strömungsgeschwindigkeiten erhöhten. Dies wurde entweder durch eine externe Erhöhung der Einströmgeschwindigkeit oder eine lokale Geschwindigkeitserhöhung aufgrund lokaler Blockaden erreicht. Da durch die Auflösung einer Blockierung im Weiteren die Partikelkonzentration in der Strömung erhöht war, kam es strömungsabwärts oft zu einer erneuten Blockierung der Partikel im Strömungskanal.

Die kleineren Partikel (Durchmesser ca. 0,2 mm) zeigten in Mikrostruktur 2 gleiche Anhaftungsmechanismen wie die größeren Partikel. Durch die notwendig größere Menge an Partikeln wurden bei den Versuchen mit den kleineren Partikeln weniger Kanäle komplett blockiert. Einzelne ruhende Partikel wurden meist mit nachfolgenden strömenden und kollidierenden Partikeln mitgerissen und somit weitertransportiert.

Die quantitative Füllung der Gesamtstruktur mit Partikeln folgte den unterschiedlichen Partikelblockierungsme-

chanismen der beiden Strukturen. Mikrostruktur 1 füllte sich rasch nach einer ersten Blockade mit Partikeln, da es für darauffolgende Partikel wenig Ausweichmöglichkeiten aufgrund der geraden Strömungslinien gab. Die Füllung der Gesamtstruktur endete entweder wenn die Strömungsgeschwindigkeit in den verbleibenden freien Kanälen sehr hoch war oder wenn die Strömungskanäle bereits am Anfang blockiert wurden und somit keine weiteren Partikel stromabwärts transportiert werden konnten. Durch die kreuzenden Strömungslinien in Mikrostruktur 2 und die dadurch gegebene Möglichkeit strömender Partikel eventuelle Blockaden zu umströmen, füllte sich die gedrehte Mikrostruktur 2 weitaus langsamer als die Mikrostruktur 1 mit den geraden parallel verlaufenden Hauptströmungskanälen (Bild 7).

Da steigende Einströmraten auch eine steigende Anzahl von Partikeln mit sich führten, füllten sich die Strukturen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten rascher. Insbesondere in der geraden Struktur kam es dabei häufig zu Blockierungen der Strömungskanäle bereits am Zu-

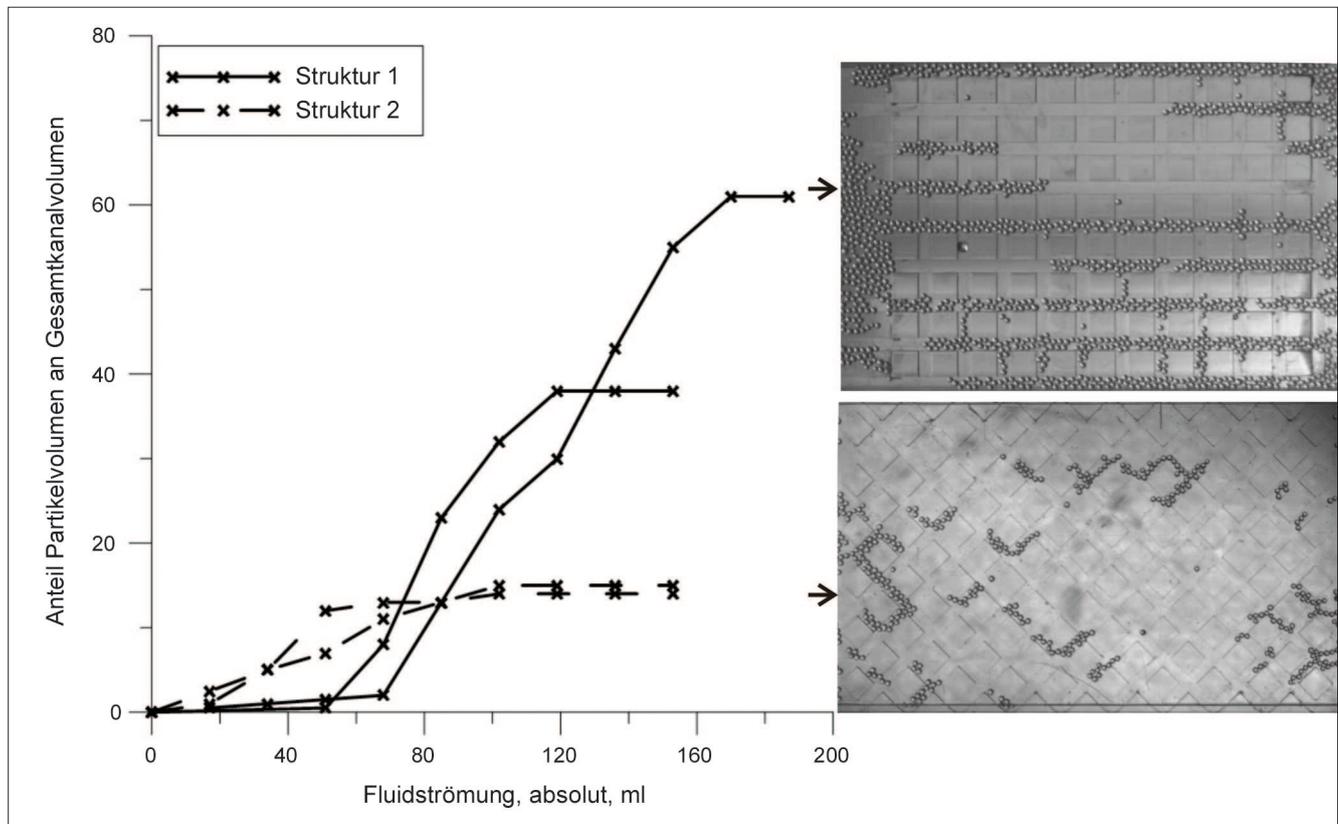


Bild 7: Absolute Partikelfüllung der beiden Versuchsstrukturen im Verlauf von jeweils zwei Versuchen mit Strömungsraten von 0,25 ml/s und kontinuierlicher Partikelzugabe im Zustrom. Die Bilder zeigen die Füllung der Strukturen am Ende eines Versuchslaufes mit Partikelgröße 0,4 mm bis 0,5 mm.

Figure 7: Total particle filling of structure 1 and structure 2, each for two experimental runs, with fluid rates of 0.25 ml/s and continuous particle feeding. The pictures show the structure fillings at the end of one experimental run with particle sizes of 0.4 mm to 0.5 mm.

lauf zur Mikrostruktur, wodurch keine weiteren Partikel durch die Mikrostruktur transportiert werden konnten.

Bei Mikrostruktur 1 wurde beobachtet, dass sich viele Partikel direkt hinter den Strömungskanälen am Ende der letzten Strukturreihe ansammelten. Da die Strömung in der sich breitenen Fläche sich abrupt verlangsamte, setzten sich hier viele Partikel ab. In manchen Versuchsdurchläufen kam es dadurch zu sich aufstauenden Partikeln, die daraufhin auch die Poren blockierten, ohne dass es anfangs zu einer Blockierung in der Struktur gekommen war.

3.3 Partikelgeschwindigkeiten *Particle velocities*

Partikelgeschwindigkeiten waren generell niedriger als die Fluid-Strömungsgeschwindigkeiten. Die Partikel waren nicht in dem Fluid suspendiert, sie strömten nicht in dem Fluid sondern die Strömungskraft rollte die Partikel vorwärts, was in den Versuchsaufnahmen als Video durch die Schatten der Partikel deutlich zu sehen war.

Die großen Partikel wurden ab einer Initialströmungsrates von 0,16 ml/s in Bewegung gesetzt. Dies entspricht einer lokalen Strömungsgeschwindigkeit im Zulauf von ca. 6,5 mm/s. Die kleinen Partikel wurden ab einer Fluidströmungsrates von 0,095 ml/s, entsprechend einer lokalen Strömungsgeschwindigkeit im Zulauf von ca. 3,8 mm/s in Bewegung gesetzt. Da die Strömungsgeschwindigkeiten in der Struktur nicht gemessen wurden, konnten sie zur Versuchsauswertung nur entsprechend der Einlaufgeschwindigkeit und der Strömungsfläche gemittelt werden. Im Laufe erhöhter Blockierung einzelner Strömungskanäle erhöhten sich in den durchströmten Kanälen die Strömungsgeschwindigkeiten. Erhöhte Partikelgeschwindigkeiten, die durch Partikel-Tracking ermittelt werden konnten, entsprachen daher insbesondere in Struktur 1, in der es zu stärkeren Blockierungen kam, lokal erhöhten Fluid-Strömungsgeschwindigkeiten (Bild 8).

Die Geschwindigkeiten einzelner Partikel variierten stark, wobei die hohe Varianz durch starke Ausreißer gegeben war. Es konnte grob ein linearer Trend zwischen Partikelgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeiten beobachtet werden (Bild 9, Medianwerte). Die Fluidgeschwindigkeiten entsprachen hierbei den mitt-

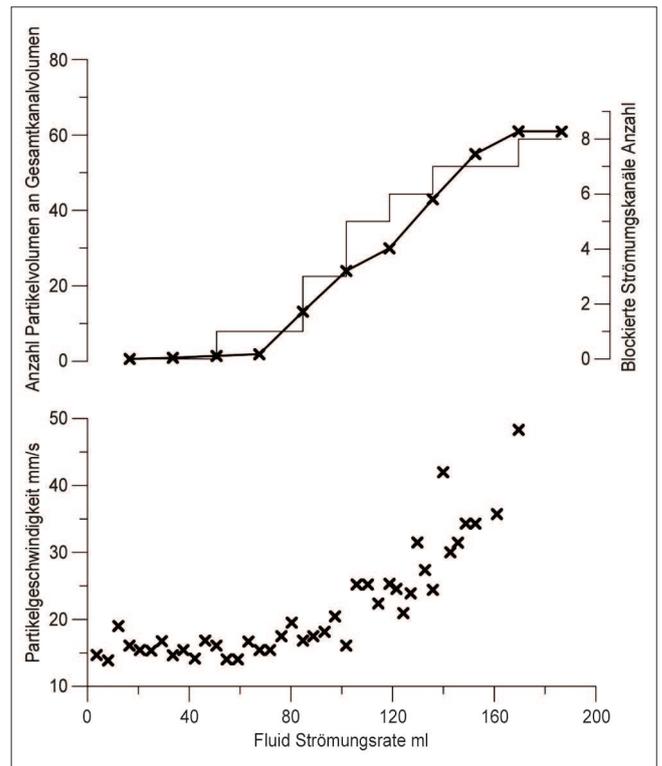


Bild 8: Partikelgeschwindigkeiten in Struktur 1 in Bezug zu Blockierung der Strömungskanäle, gegeben als volumetrische Partikelfüllung in der Struktur, und einer entsprechenden Erhöhung der Fluidgeschwindigkeit in den freien Strömungskanälen. Die Zuströmgeschwindigkeit in die Zelle war mit 7,5 mm/s konstant.

Figure 8: *Particle velocities in structure 1 related to increased channel blocking, given by volumetric particle filling in the structure, and the consequent increase in fluid velocity in the free channels. The influx rate into the cell was constant at 7.5 mm/s.*

leren Geschwindigkeiten in den Strukturkanälen ohne Berücksichtigung der Geschwindigkeitsänderungen aufgrund blockierter Kanäle. Fluidgeschwindigkeiten wurden in gemittelte lokale Reynoldsgeschwindigkeiten Re umgerechnet:

$$Re = (vL)/\nu$$

mit v charakteristische Fluidgeschwindigkeit in m/s, L Länge eines Strukturelementes mit 2 mm und ν kinematische Fluidviskosität mit $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Zur Berücksichtigung sowohl der kleinen als auch der großen Partikel in die Geschwindigkeitsauswertung wurden die Partikelgeschwindigkeiten in Stokesche Kräfte F_D umgerechnet:

$$F_D = 6 \pi \nu p V d$$

mit ρ Dichte des Fluids, V Geschwindigkeit des Partikels relativ zum Fluid und d Partikeldurchmesser in m.

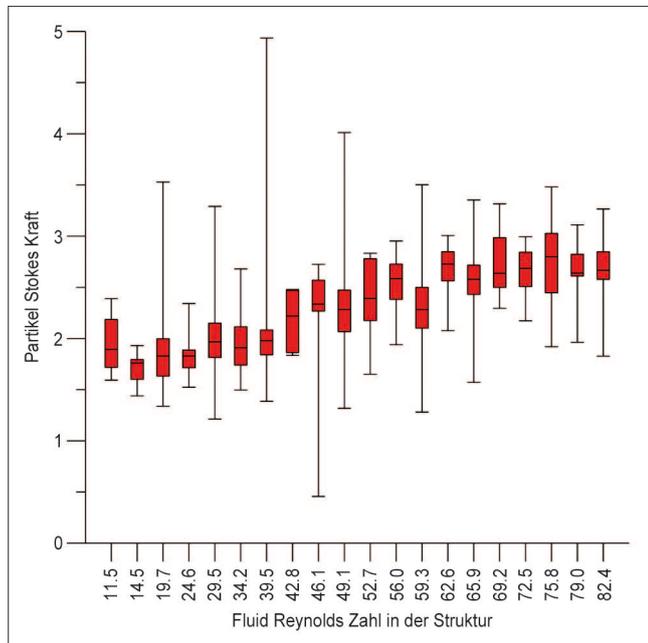


Bild 9: Boxplot von Partikel Stokes Geschwindigkeit in Struktur 2 aus 550 Partikelgeschwindigkeiten im Verhältnis zu Zufluss Strömungsraten in Reynolds-Geschwindigkeiten (die Box begrenzt das obere und untere Quartil der Daten, in der Box liegt der Medianwert, die Linien schließen den gesamten Datenbereich ein)

Figure 9: Boxplot of particle Stokes drag in structure 2 with a total of 550 analyzed particles, related to increasing influx fluid Reynolds numbers regulated by mean fluid velocities (box with median, confined by upper and lower quartiles; the lines include the whole data set)

3.4 Bewegungslinien der Partikel *Particle velocities*

Die Visualisierung der Bewegungslinien der Partikel verdeutlichte die unterschiedlichen Partikelwege und -umwege in den beiden Strukturen.

In Mikrostruktur 1 passierten die Partikel nur die in Strömungsrichtung gelegenen Hauptströmungskanäle. Dies resultierte in ein rasches Blockieren der Kanäle bei rasch aufeinanderfolgenden Partikeln. Nur bei lokal stark erhöhten Fluidgeschwindigkeiten umströmten vereinzelt Partikel die Strukturelemente durch die horizontal zur Strömungsrichtung gelegenen Seitenkanäle.

In Mikrostruktur 2 dienen die Hauptströmungskanäle der Struktur als direkte Route eines Partikels. Im Falle

von Blockierungen hatte das Partikel die Möglichkeit in einen benachbarten Porenkanal zu wechseln, so dass die Partikel durchgängig die gesamte Porenstruktur passieren konnten. Ohne Blockierung wurden die Partikel auf den direkten Strömungslinien transportiert (Bild 10).

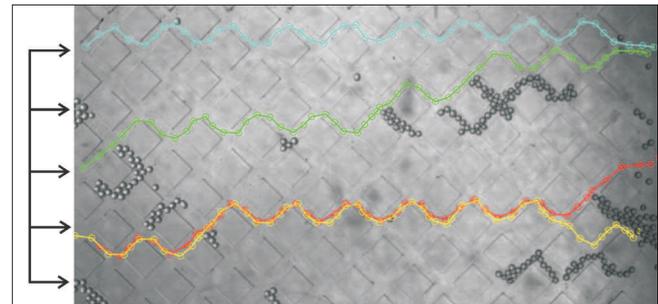


Bild 10: Strömungslinien einzelner Partikel mit Ausweichrouten bei verstopften Kanälen

Figure 10: Particle trajectories with typical turnouts of the particles when single channels are clogged

4 Diskussion und Zusammenfassung *Remarks and conclusions*

Die zweidimensionalen Porenraum-aufgelösten Versuche haben gezeigt, dass Partikeltransport und Mechanismen des Ab- und Eintrags von Feinmaterial in eine poröse Struktur stark von kleinen Variationen der Kanalordnung abhängen, unabhängig von makrostrukturellen Parametern wie der Porosität. Die Änderung mikrostruktureller Anordnungen der Porenkanäle veränderte nicht nur lokales Partikelverhalten im Hinblick auf Transport und Anhaftung sondern auch den Partikeldurchgang und die Partikelblockierung in Bezug auf das gesamte Strukturelement.

Betrachtet man Anhaftungsmechanismen einzelner Partikel, so sind diese nicht unbedingt nur beeinflusst von geometrischen Struktureigenschaften, sondern auch durch zufällige Faktoren aus kleinen Änderungen der Form einzelner Partikel und Partikelverteilungen in einzelnen Kanälen im Gegensatz zu der Gesamtkonzentration der Partikel in der Gesamtstruktur.

Betrachtet man die physikalischen Struktureigenschaften, so besteht zwischen den beiden Mikrostrukturen 1 und 2 nur der Unterschied in hydraulischer Tortuosität in Strömungsrichtung. Strömungswindungen werden in hydraulischen Transportstudien oft vernachlässigt,

da diese in unstrukturierten Medien schwer zu definieren sind. In numerischen Modellen wird der Faktor der Tortuosität oft als Anpassungsfaktor zu experimentellen Daten eingesetzt. Hierbei wird jedoch nicht zwangsläufig die bestehende physikalische Struktur der Strömungspfade berücksichtigt (Ghanbarian et al., 2013). Die Versuche zeigten jedoch für die effektiven Strömungskanäle, dass die Erhöhung hydraulischer Tortuosität Regionen von niedrigen und keinen Flussraten in einer Struktur deutlich erhöhen. Auch wenn die Tortuosität nicht unbedingt die Permeabilität einer Struktur ändert, so wird diese Änderung bei Betrachtung von Partikeltransport eventuell unterschätzt, da auch kleine Änderungen der Strömungswindung eine erhöhte Möglichkeit von Kollision der Partikel an der Struktur und demzufolge einem Abbremsen von Partikeln mit sich ziehen kann.

Bezüglich Blockierungsmechanismen durch Partikel kann eine Erhöhung der hydraulischen Tortuosität durch geänderte Anordnung der Strömungskanäle dazu führen, dass Partikel aus einer blockierten Hauptströmungslinie ausweichen können und damit eine Verstopfung der Gesamtstruktur verhindert wird.

Ein wichtiger Faktor hinsichtlich Transport- und Blockierungsmechanismen von Partikeln in einer porösen Struktur ist die Konzentration der Partikel im mitführenden Strömungsmedium. Bei Betrachtung eines gesamten Strukturelementes ist jedoch nicht die Gesamtkonzentration der Partikel ausschlaggebend, sondern die lokale Konzentration in einem Strömungskanal. Bei der Berücksichtigung eines Elementes auf der Makroskala könnte hierfür eine Funktion der Zufallsverteilung zur Partikelkonzentration eingesetzt werden, um realistische unterschiedliche lokale Partikelverteilungen zu berücksichtigen. Für die numerische Berechnung muss weiterhin die Dynamik der Partikelanhaftung und -blockierungen berücksichtigt werden, die eine Änderung der hydraulischen Eigenschaften und lokal teilweise stark erhöhte Geschwindigkeiten nach sich zieht.

Blockaden kompletter Strömungskanäle resultieren in Strömungsgeschwindigkeiten, die die Gesamtstruktur in zwei Kompartimente aufteilt, ein Teil ohne Strömung und ein Teil mit erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten. Die Anwendung einer gemittelten Strömungsgeschwindigkeit ist hier unter Umständen nicht anwendbar, da

die erhöhten lokalen Geschwindigkeiten zu Turbulenzen und einem stark veränderten Transportverhalten von Partikeln führen kann.

Insgesamt zeigten die Versuche, dass die Annahme der Zellstruktur als ein Gesamtvolumen, über das Transport- und Strömungsparameter gemittelt werden, falsche Annahmen zu Partikeltransport- und -anhaftungsmechanismen gemacht werden, da insbesondere lokal veränderte Strömungsgeschwindigkeiten und auch lokal unterschiedliche Partikelkonzentrationen zu Partikeltransport, Partikelabsetzung und Partikelblockaden führen.

Betrachtet man die in den Versuchen angewendeten Partikel-zu-Porenengstellen-Verhältnisse, sollte es bei Einzelpartikeln nicht zu Partikelanhaftungen kommen. Dies ist vielmehr ein Vorgang der Partikelkonzentration. Trotzdem haben die Versuche gezeigt, dass auch einzelne Partikel, abhängig von lokalen Strömungsverhältnissen sich an der Struktur anlagern und somit den Strömungsquerschnitt verringern, sodass nachfolgende Partikel zu einer Gesamtblockierung beitragen können, auch wenn die ursprüngliche Partikelkonzentration niedrig war. Insgesamt sollten für die Implementierung der Versuchsergebnisse in skalierte Terme für hydraulischen Materialtransport und die Anhaftung und Blockierung des Materials in einer porösen Struktur weitere Versuche mit partiell regulären als auch unregulären Eigenschaften durchgeführt werden (wie beschrieben in Karadimitriou und Hassanizadeh, 2012). Dies führt zu einer schrittweisen Erhöhung der Anpassung von strukturierten Mikromodellen an natürliche Bodenverhältnisse.

Die in diesem Artikel beschriebenen Versuche mit regulärer Strukturanordnung haben klar gezeigt, dass die Fragestellung von hydraulischem Materialtransport sehr komplex ist hinsichtlich des Transports, der Anhaftung und Blockierungsmechanismen sowie der dazu führenden geänderten Transporteigenschaften des betrachteten Mediums. Die Versuche haben gezeigt, dass Partikeltransport in einer Porenkanalstruktur stark abhängen von kleinen Änderungen der Kanalordnung, unabhängig von makrostrukturellen Eigenschaften wie der Porosität.

5 Literatur *References*

- Auset, M. and Keller, A. (2004): Pore-scale processes that control dispersion of colloids insaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 40, W03503, doi:10.1029/2003WR002800.
- Auset, M. and Keller, A. (2006): Pore-scale visualization of colloid straining and filtration in saturated porous media using micromodels. *Water Resour. Res.* 42, W12S02, doi:10.1029/2005WR004639.
- Bacchin, P.; Derekx, Q.; Veyret, D.; Glucina, K.; Moulin, P. (2014): Clogging of microporous channel networks: role of connectivity and tortuosity. *Microfluidics and Nanofluidics*, 17(1), 85-96, doi:10.1007/s10404-013-1288-4.
- Bear, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Comp., Inc., New York.
- Bradford, S. A.; Yates, S. R.; Bettahar, M. und Simunek, J. (2002): Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media. *Water Resour. Res.*, 38(12), 1327, doi:10.1029/2002WR001340.
- Carman, P. C. (1937): Fluid flow through a granular bed. *Trans. Inst. Chem. Eng. London* 15, 150-156.
- Carrier III, W. D. (2003). Goodbye, Hazen; Hello Kozeny-Carman. *J. Geotech. Geoenviron.*, 129, pp. 1054-1056.
- Chen, C.; Packman, A. I.; Gaillard, J.-F. (2008): Pore-scale analysis of permeability reduction resulting from colloid deposition. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L07404, doi:10.1029/2007GL033077.
- Coussy, O. (2010): *Mechanics and Physics of Porous Solids*. 1st ed., Wiley & Sons, Chichester.
- Dullien, F. A. L. (1992): *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*. Academic Press, Inc.
- Ehlers, W. and Bluhm, J. (2002): Foundations of multiphase and porous materials. In *Porous Media: Theory, Experiments and Numerical Applications*. Berlin: Springer, pp. 3-86.
- Ferreira, T. and Rasband, W. (2012): ImageJ User Guide IJ 1.46r. <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>.
- Ghanbarian, B.; Hunt, A. G.; Ewing, R. P.; Sahimi, M. (2013): Tortuosity in Porous Media: A Critical Review. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 77:1461–1477, doi:10.2136/sssaj2012.0435.
- Herzig, J. P.; Leclerc, D. M.; Goff, P. Le (1970): Flow of Suspensions through Porous Media – Application to Deep Filtration. *Industrial and Engineering Chemistry*, 62(5): 8-35.
- Indraratna, B. and Locke, M. R. (1999): Design methods for granular filters – critical review. *Proceedings of the ICE – Geotechnical Engineering*, Volume 137, Issue 3, pages 137 - 147.
- Karadimitriou, N. K. and Hassanizadeh, S. M. (2012): A Review of Micromodels and Their Use in Two-Phase Flow Studies. *Vadose Zone J.*, Vol. 11, doi:10.2136/vzj2011.0072.
- Kenney, T. C. and Lau, D. (1985): Internal Stability of Granular Filters. *Can. Geotech. J.* 22: 215-225.
- Khilar, K. C. und Fogler, H. S. (1998): *Migration of Fines in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Marot, D. and Benamar, A. (2012): Suffusion, Transport and Filtration of Fine Particles in Granular Soil. In: Bonelli, S.: *Erosion of Geomaterials*. ISTE Ltd 2012 London.
- McDowell-Boyer, L. M.; Hunt, J. R.; Sitar, N. (1986): Particle-transport through porous media. *Water Resour. Res.*, 22, 1901-1921.
- Meijering, E.; Dzyubachyk, O. und Smal, I. (2012): Methods for Cell and Particle Tracking. *Methods on Enzymology*. Vol. 504, Ch. 9, pp. 183-200.
- MMB (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- Moffat, R. A. und Fannin, R. J. (2006): A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soil. *Geotechnical Testing Journal*, 29(4): 273-279.

- Pfletschinger-Pfaff, H.; Kayser, J.; Steeb, H. (2014): Mehrphasenmodell zur Simulation von Suffosion. Johann-Ohde-Kolloquium 2014, Mitteilung Nr. 19 / TU Dresden, Institut für Geotechnik.
- Rajagopalan, R. and Tien, C. (1976): Trajectory analysis of deep-bed filtration with the sphere-in-cell porous media model. *AIChE J.*, 22, 523-533.
- Sakthivadivel, R. (1969): Clogging of a Granular Porous Medium by Sediment. HEL-15-7, Hydraulic Engineering Laboratory, Univ. of California, Berkeley, Calif.
- Saktihivadivel, R.; Thanikachalam, V.; Seetharaman, S. (1972): Headloss theories in filtration. *J. Am. Water Works Assoc.* 64(4), 245-254.
- Sbalzarini, I. F. and Koumoutsakos, P. (2005): Feature point tracking and trajectory analysis for video imaging in cell biology. *J. Struct. Biol.*, 151(2): 182-195.
- Schauffler, A.; Becker, C.; Steeb, H. (2013): Infiltration processes in cohesionless soils. *Z. Angew. Math. Mech.*, 93 (2-3): 138-146.
- Skempton, A. W. und Brogan, J. M. (1994): Experiments on Piping in Sandy Gravels. *Geotechnique*, 44(3): 449-460.
- Steeb, H. (2010): Internal erosion in gasflow weak conditions. *AIP Conf. Proc.* 1227, 115, doi: 10.1063/1.3435382.
- Sterpi, D. (2003): Effects of the Erosion and Transport of Fine Particles due to Seepage Flow. *Int. J. Geomech.*, 3(1), 111-122.
- Terzaghi, K. (1925): *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke: Wien.
- Wadell, H. (1934): Shape determination of large sedimental rock fragments. *The Pan-American Geologist*, Vol. 61, pp. 187-220, 52.
- Wadell, H. (1935): Volume, shape, and roundness of quartz particles. *Journal of Geology*, Vol. 43, pp. 250-279.
- Zhang, X. S.; Wong, H.; Leo, C. J.; Bui, T. A.; Wang, J. X.; Sun, W. H.; Huang, Z. Q. (2013): A Thermodynamics-Based Model on the Internal Erosion of Earth Structures. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 31(2): 479-492, doi:10.1007/s10706-012-9600-8.